

南ドイツのリース(RIES)隕石孔： その成因についての推論と解釈の変遷

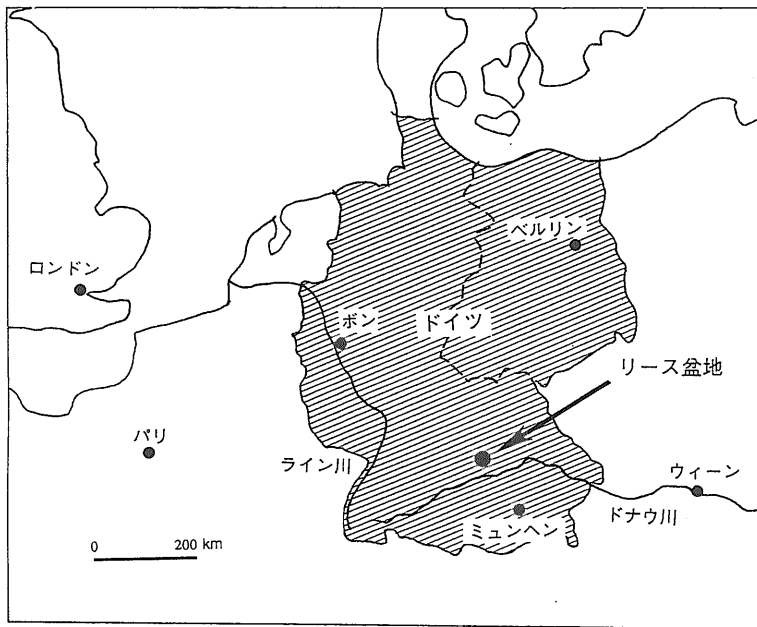
白井 正明¹⁾

1. はじめに

近年、地球型惑星は数多くの小天体が衝突して形成されたと言われるようになり、宇宙空間から地球上に落下してきた隕石は、太陽系及び地球が形成された当時の情報を保存していると考えられている。また、地質時代に大量絶滅を引き起こしたような環境の激変の原因として、隕石の地球への衝突が挙げられている。これらの諸問題からも、現在、地上の隕石及び隕石の衝突によってできる隕石孔の研究は大きな注目を浴びている。しかしクレーターの多くは古い火山の噴火口と長い間考えられてきて、火口

だけでなく、隕石孔もあるということが広く認識されるようになったのは最近のことである。その例としてリース盆地を取り上げたい。

リース盆地はヨーロッパのほぼ中央、ドイツ南部のミュンヘンの北西に位置している(第1図)。この盆地は、近代地質学をリードしてきたドイツ国内に位置していることもあり、その特異な地形と岩相は研究者達の興味を絶えず集めてきた。近代の地質学・地球科学の流れにおいて、当時の常識・風潮を反映して火山起源、氷河起源などと言われてきたが、現在では隕石の衝突により形成されたと判明している。本稿ではそれらの説がいかなる根拠に基づ



第1図 リース盆地の位置

1) 名古屋大学理学部ただし現在は東京大学理学部：〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

キーワード：リース盆地(Rieskessel), クレーター, 成因研究史, スューバイト(Suevite), モルダバイト(Moldavite)

第1表 リース周辺の層序表(Dennis, 1971を簡略化)

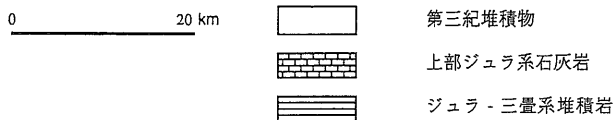
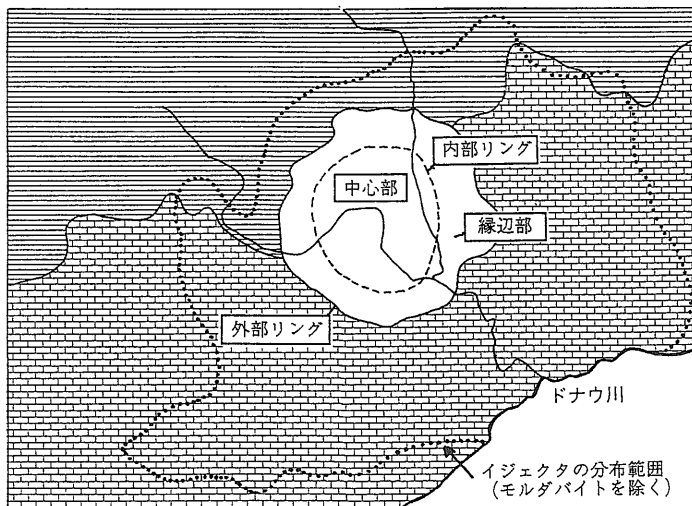
系	統	岩相	層厚 (m)
ジュラ系	マルム統	厚層~塊状石灰岩	200
		成層石灰岩	100
	ドッガー統	篩状石灰岩, 砂岩 頁岩, 石灰質砂岩 青灰色頁岩	50 90
	ライアス統	マール, 頁岩, 石灰岩, 砂岩	30
三畳系 (上部・中部)	コイパー統	マール 砂岩, 頁岩	25 450
	ムッセルカルク統	石灰質砂岩	50
下部三畳系 二畳系		陸成相, 海進相	0-200
基盤		花崗岩類, 片麻岩 石灰質-珪質岩, 角閃岩	

き, どのように議論されてきたかを大まかにではあるが紹介する。

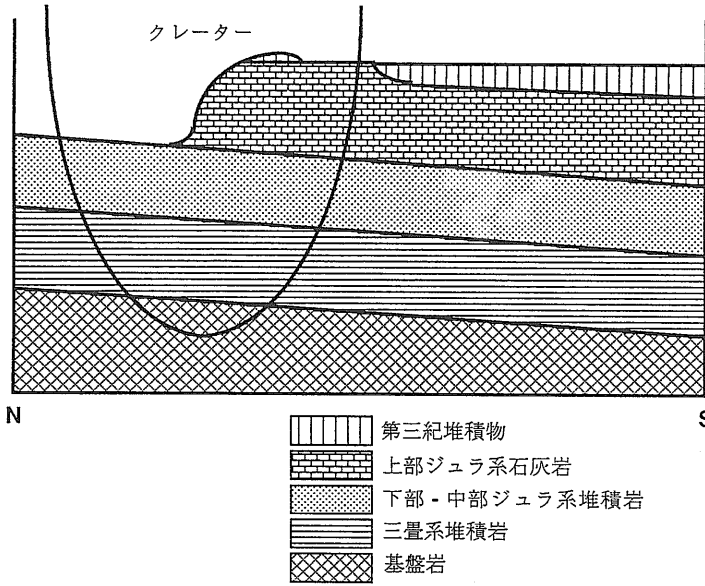
2. リースの地形と地質

リース盆地は直径22~24 km あり, ドナウ川北岸に位置し, 地質学的にはパリスカン帯中の南西ド

イツ地塊南端の, 南から南西に傾斜した傾動地塊上に存在する。基盤岩は主に花崗岩類および変成岩から成り, 上部に厚さ1,000 m 近くの中生代の堆積岩が存在する(第1表)。中生層は主に砂岩, マール, 石灰岩から構成され, 特に最上部のジュラ系最上部のマルム統の石灰岩は強固で風化にも強く, リース盆地から南側では侵食されずによく残っている(第



第2図 リース周辺の地質と地形的区分 (Hüttner, 1969を基に構成)



第3図 クレーター形成直前の地質断面概略図 (Hüttner, 1969を簡略化)

2図, 第3図).

この盆地は、盆地内の直径約12 kmの内部リング(inner rim)によって、いくつかの地域に分けられる。

(1) 中心部(central zone) 内部リングの内側。第三紀以降の湖成堆積物等が堆積し現在の地表は平坦、海拔約420 m。

(2) 内部リング 比高50 m程の丘の列からなり、

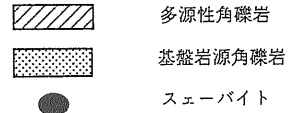
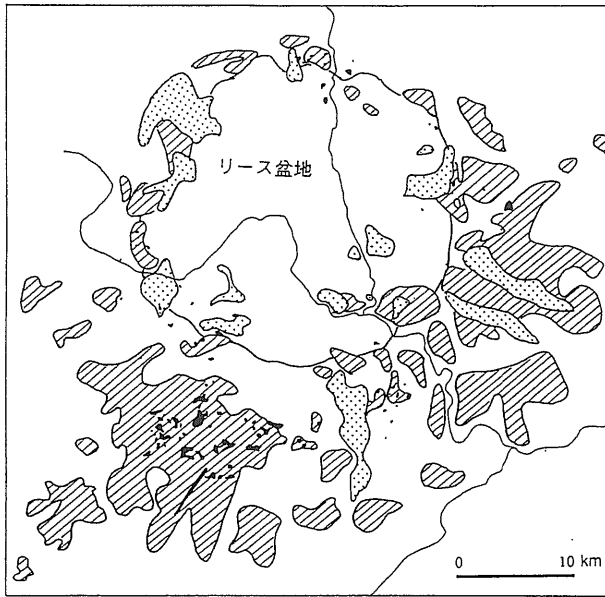
北西が開いた馬蹄形をなす。

(3) 縁辺部(marginal zone) 内部リングから盆地の縁までの地域で、起伏が激しい。盆地の外より標高の高い部分もある。標高の低い部分は、やはり湖成層に覆われている。

(4) 外部リング(outer rim) 盆地の縁に相当する。縁辺部の起伏に影響を受け、輪郭ははっきりしない。南部は標高約600 m, 北部は標高約500 m(第

第2表 衝撃変成作用の程度の段階 (Engelhardt and Stöffler, 1968を改正)

圧力(GPa)	衝撃変成の段階	特徴的な現象	衝突時の温度(°C)
10	Stage 1	破碎, 可塑的な変形	100
25-30	Stage 2	相転移	200-300
50-55	Stage 3	部分的な熔融	1200-1500
60-65	Stage 4	熔融, グラスボムができる	2000-3000
100		蒸発	5000



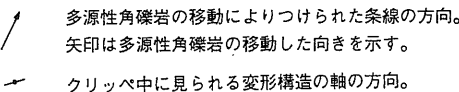
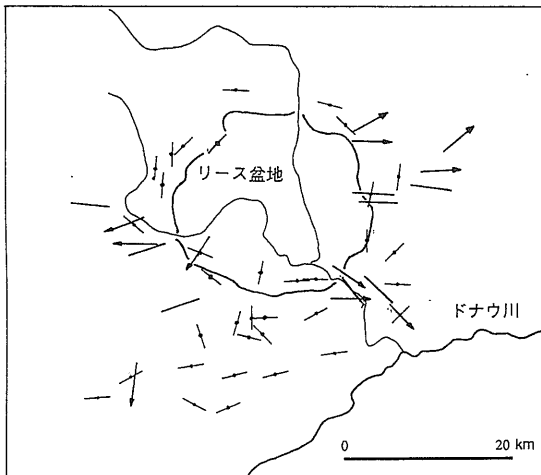
第4図 噴出物の分布
(Hütner, 1969および Engelhardt, 1972を基に構成)

3 図).

(5) 外部(outside) 二つのリングが発見されている。直径はそれぞれ34 km, 45 km である。

3. リースの噴出物

隕石孔において火山の噴出物にあたるものを一般にイジェクタと呼ぶが、リースのイジェクタは以下



第5図 噴出物中の諸構造
(Wagner, 1964を簡略化)

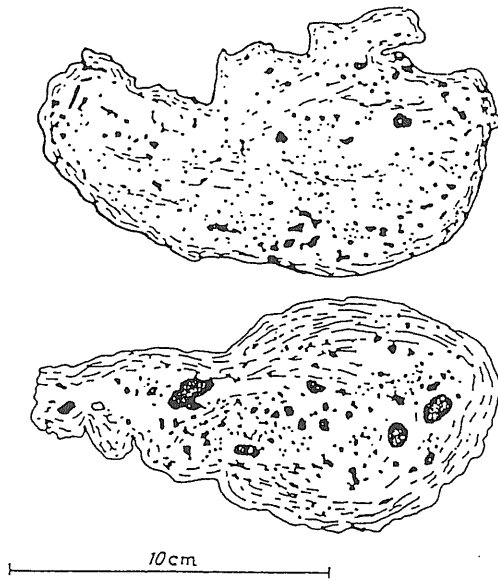
に記すように4~5種類ほどに分類されている。

(1) 多源性角礫岩(Bunte breccia)

表層部の第三紀堆積物から中生代の堆積岩、基盤岩までの岩片を含む。特にマルム石灰岩の岩片を多く含む。泥質の基質が大部分を占め、礫・基質ともに淘汰が悪い。弱い衝撃変成作用(ステージ1~2)を示す(第2表)。縁辺部より外側に見られ、クレーターの南西から東にかけ広く分布する(第4図)。特に、南部に分布するマルム石灰岩上のもは石灰岩の表面をはぎ取ったり、条線を刻み込んでいることから、地面と平行に移動したものと解釈されている。第5図に示されているように、この条線の方法は正確に中心部から放射状になっているわけではなく、多少不規則になっている。原因としては、地形、乱流の影響やクレーター形成の二次的過程による改変等が考えられている。

(2) クリップ

主にマルム石灰岩からなる巨大な異地性の岩体で、大きさは25 m程から1 kmを越えるものまである。良く破碎されている。多源性角礫岩の礫の巨大なものと考えられる。縁辺部から外側に存在し、特に縁辺部の南部では盆地の輪郭が不明瞭になるほど発達している。岩体の内部に褶曲構造や節理が見られるものがあるが、こういった変形の軸は概ねクレーターの外形に平行で(第5図)、クレーターの形成時に出来たと推定されている。



第6図 フォールアウトスューバイト中のガラスボム
(Hörz, 1965より引用)

(3) 基盤岩源角礫岩(Crystalline breccia)

基盤岩を構成する花崗岩類および片麻岩(つまり crystalline rocks)の岩片からなる角礫岩で、クレーター中心部近くに発達し、内部リング及び中央部に、直径100 m 程の岩体として点在している。小さなものはクレーター外にも放射線状に分布している(第4図)。弱～中程度の衝撃変成(ステージ1～2)を示し(第2表)、石英の高圧相のコーサイト、スティショバイトも含まれている。

(4) スューバイト(Suevite)

スューバイトはリース特有の岩石で、火山弾に相当するガラスボム(glass bomb)(第6図)を多く含んだ礫岩である。内部リングの外側の地表に露出しているものをフォールアウトスューバイト(fallout suevite)、中央部の湖成堆積物の下に位置しているものをクレータースューバイト(crater suevite)と呼ぶ。両者は、噴出・堆積の仕方が異なっている。フォールアウトスューバイトは、現在では侵食等により、地表部にわずかに分布しているだけである。その構成は、かなりモンモリロナイト化した基質約80%、岩片10%以下、ガラスボム10～20%である。モンモリロナイトはクレーター形成直後に熱水変質により生じたと考えられている。岩片は様々な変成度を示し、コーサイト、スティショバイトを含む。

ガラスボムは隕石衝突時の高温高圧により融けた物質、インパクトメルト(impact melt)が飛行中に固結したもので、数cmから数十cmの大きさである。皿状の外形をもつものが多く、涙滴状のものは少ない。内部の気泡の形状から高速で大気中を飛行したと考えられる。火山弾によく見られるパン皮状ひび割れは見られない。下部の多源性角礫岩との境界の様子から堆積直後に流動し再堆積した可能性がある。

クレータースューバイトは中央部において地下数百mからボーリングコアとして採取されるため、サンプル数が少ない。ガラスボムが空気抵抗を受けた形状を示さず、爆発時の衝撃波のためクレーターの上空が高温低圧になったためと説明されている。

(5) モルダバイト(Moldavite)

リース東方260～400 kmのチェコ付近に分布するテクタイトの一種はモルダバイトと呼ばれている。リースのイジェクタ中のガラス質と同程度の年代を示すことからリースのイジェクタの一部と判断された(第3表)。

これらのイジェクタの分布、内部リングの形状等から隕石は北西から斜めに衝突したと考えられている。

4. リースの成因研究史

リースの成因に関する論争は1960年代に一段落した。このため原論文の入手が困難であり、

- (1) Dennis, 1971及び
- (2) Engelhardt, 1982の二つの論文の孫引きが多くなっている。

リース盆地に初めて地質学的な眼が向けられたのは18世紀末である。Caspers (1792)⁽²⁾は建築資材としてスューバイトに注目した。彼は火山噴出物とスューバイトの類似から、リース盆地は火山が開析された成れの果てと考えた。

火山起源説は、衝突起源説が確かめられるまで最も有力な説であった。特に19世紀前半までは、スューバイトは火山噴出物と考えられ、専ら火山起源説が信じられていた。Cotta (1834)⁽²⁾はスューバイトを玄武岩質凝灰岩と比較、またSchafhäütl (1849)⁽²⁾がスューバイトの化学分析を行い、黒っぽい外見であるがSiO₂が多く黒曜石に近い物質と判

第3表 噴出物の年代
 上がモルダバイト, 下が盆地周辺のスェーバイト中のガラスの年代
 (Gentner et al., 1967を簡略化)

	フィッシュオントラック年代 (Ma)	(平均)	K - Ar 年代 (Ma)
	(平均)		
モルダバイト 1	14.5 ± 0.5	14.1 ± 0.6	14.7 ± 0.7
モルダバイト 2	13.4 ± 0.7		
モルダバイト 3	13.9 ± 0.5		
モルダバイト 4	14.2 ± 0.7		
モルダバイト 5	14.5 ± 0.5		
スェーバイト 1	14.0 ± 0.5	14.0 ± 0.6	14.8 ± 0.7
スェーバイト 2	14.1 ± 0.6		
スェーバイト 3	13.7 ± 0.6		
スェーバイト 4	14.6 ± 0.6		
スェーバイト 5	13.4 ± 0.7		

断した。

これらに対し19世紀の末, Deffner (1870)⁽²⁾が氷河起源説を主張した。彼はその前年に Fraas と共に多源性角礫岩を調査し, 下位の石灰岩の表面に条線が刻み込まれていることを発見した。そして, この条線と氷河地域の擦痕との類似, そしてモレーンとリース周辺の礫岩がともに淘汰が悪いということをもとにこの説を主張したのである。彼が氷河起源説を主張した背景には, 当時 Agassiz (1840) のアルプスの氷河研究を中心にして, 氷河の営力の大きさ, 氷期の存在など氷河についての研究が発展してきたことがあるのは否めない。

しかしその一方で, Fraas (1885)⁽²⁾は盆地から大量の物質を押し出すには氷河の力だけでは不可能と考え, 火山起源説を主張した。その後も Koken (1901, 1902)⁽²⁾が氷河と火山の複合成因説を唱えた。他は火山起源説が主張されるばかりであった。

火山起源説にも様々な説があった。19世紀末 Gumbel (1870, 1891, 1894)⁽²⁾らはスェーバイト中の岩片を顕微鏡で観察した。それ以前は, スェーバイトはその分布の様子から複数の火道から噴出した凝灰岩と考えられていたが, 彼はどのスェーバイトにも共通した特徴があることからクレーター中央部の同一の火道から噴出した同一の起源の凝灰岩と考えた。Branco⁽²⁾は1901年に貫入岩体の上昇により山体が隆起し, 山体の崩壊により礫岩の形成が起こ

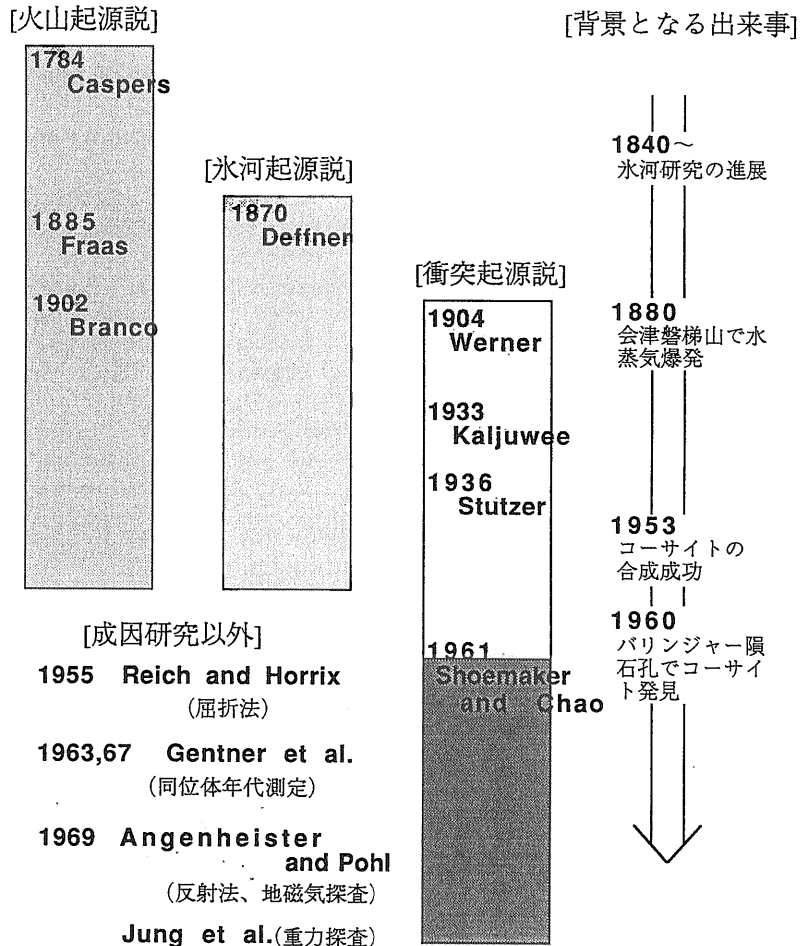
り, その後凝灰岩(これはスェーバイトのことである)が大量に噴出しそのために火山が陥没して盆地が出来たというモデルを考えた。しかし, 翌年にはこの説を改め, 山体の隆起の原動力を水蒸気爆発とした。これは, 1888年に会津磐梯山で起きたように, 火山活動の一つとして水蒸気爆発という現象があるということが明らかになったことに大きな影響を受けている。

20世紀前半には, Suess (1909)⁽²⁾, Kranz (1911-52)⁽²⁾に代表されるように水蒸気爆発により盆地が形成されたという考えが一般的であった。

一方, 19世紀末の, アリゾナのバリンジャークレーター衝突起源説に影響され, 20世紀前半には, 3名の学者がリース盆地の衝突起源説を主張した。

Werner (1904)⁽²⁾はリース盆地と月のクレーターの地形的特徴を比較し, リースが衝突起源ではないかとの疑問を提示した。Kaljuwee (1933)⁽²⁾は, 過去に多くの巨大隕石が地表に激突したと考え, アフリカの Bosumtwi 湖とリース盆地は隕石孔だと主張した。また, Stutzer (1936)⁽²⁾はリース盆地は水蒸気爆発による火口としては大き過ぎ, バリンジャー隕石孔と地形的に似ているということから衝突起源説を発表した。しかし, これらの説は当時の研究者達にはまるで受け入れられなかった。ちなみに, Bosumtwi 湖も現在では隕石孔と判明している。

1960年, Chao と Shoemaker らはバリンジャー



第7図 リースの成因に関する主な論文 (Engelhardt, 1982および Dennis, 1971をもとに構成)

隕石孔で、石英の高圧相のコーサイトを発見し、隕石孔にコーサイトが存在することを確認した。彼らはこの成果を試せる他の場所を捜し、リースの岩石を調べることにした。そして翌年、いくつかのスーパーサイトのサンプル中の岩片よりコーサイトを発見し、衝突起源説が決定的になったのである。

他にも20世紀後半には、弾性波〔屈折法(Reich and Horrix, 1955⁽¹⁾)、反射法(Angenheister and Pohl, 1969⁽¹⁾)〕、地磁気(Angenheister and Pohl, 1969⁽¹⁾)、重力(Jung et al., 1969⁽¹⁾)等を用いた様々な物理探査が試みられ、リース盆地の地下の構造も明らかになってきた。またGentnerら(1963, 1967)はK-Ar法、フィッシュントラック法によるスーパーサイトの年代測定を行い、リースの形成年代は14～15 Ma という結果を得た。これがモルダバ

イトの年代とほぼ一致することから、モルダバイトもリース起源ということが判明した。

近年はクレーター形成過程を解明することを目的とした研究が多くなされ、コンピューターシミュレーション、他天体のクレーターとの比較等と絡めた議論が盛んに行なわれている。

以上のようにリース盆地の成因に関する仮説は、当時の地質学における風潮をよく反映していることが分かる。結論として、リースは地球惑星科学の新しい概念や手段を試す格好の実験場であったといえる。

謝辞：本稿をまとめるにあたって、数々の貴重な示唆と御指導をくださった名古屋大学の水谷伸治郎教授、発表の機会を与えてくださった田中剛教授、有益な助言をしてくださった足立守教授、また、興味

深い資料を紹介して下さった東京大学の吉田鎮男助教授には、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

Chao, E. C. T., E. M. Shoemaker, and B. M. Madsen (1960) : First Natural Occurrence of Coesite, *Science*, **132**, 220-221.
 Dennis, J. G., (1971) : Ries Structure, Southern Germany, A Review, 1971, *Journal of Geophysical Research*, **76**, 5394-5406.
 Engelhardt, W. v., (1972) : Impact Structure in Europe, International Geological Congress, 24th, proceeding, **15**, 90-111.
 Engelhardt, W. v., (1982) : Hypotheses of the Origin of the Ries Basin, Germany, from 1792 to 1960, *Geologische Rundschau*, **71**, 475-485.
 Engelhardt, W. v. and G. Graup (1984) : Suevite of the Ries Crater, Germany: Source Rocks and Implications for Cratering Mechanics, *Geologische Rundschau*, **73**, 447-481.
 Gentner, W., B. Kleinmann, and G. A. Wagner (1967) : New K-Ar and Fission Track Ages of Impact Glasses and Tektites,

Earth and Planetary Science Letters, **2**, 83-86.
 Grieve, R. A. F. and P. B. Roverton (1979) : The Terrestrial Cratering Record, I. Current Status of Observations *Icarus*, **38**, 212-229.
 Hörz, F., R. Ostertag, and D. A. Rainey (1983) : Bunte Breccia of the Ries; Continuous Deposits of Large Impact Craters, *Review of Geophysics and Space Physics*, **21**, 1667-1725.
 Konta, J., (1971) : Shape Analysis of Moldavites and their Impact Origin, *Mineralogical Magazine*, **38**, 408-417.
 Newsom, H. E., G. Graup, D. A. Iseri, J. W. Geissman, and K. Keil (1990) : The Formation of Ries Crater, West Germany; Evidence of Atmospheric Interactions during a Larger Cratering Event, *Geological Society of America, Special Paper*, **247**, 195-206.
 Shoemaker, E. M. and E. C. T. Chao (1961) : New Evidence for the Impact Origin of the Ries Basin, Bavaria, Germany, *Journal of Geophysical Research*, **66**, 3371-3378.

SHIRAI Masaaki (1994) : Historical review of the origin of the Ries Structure.

〈受付 : 1993年 6 月 7 日〉

新刊紹介

「恐竜のすべて」

ジャン=ギィ・ミシャル著, 阪田由美子訳,
 小島郁生監修, 創元社 知の再発見双書 15
 税込み1300円, 1992年刊

編集委員会には、いろいろな出版社から新刊書が送られて来る。内容を見て適当と思われるものは、できるだけ紹介するようにしている。新刊と言うには遅くなってしまったが、ここに挙げた1冊も紹介したいと思う書籍である。著者はフランス国立自然史博物館(パリ)の古生物学者である。

「絵で読む世界文化史」という双書の副題にあるように、この本はまず見て楽しいという点に特徴がある。ほとんど全てのページに、イラストや写真が原書と同じサイズで掲載されており、その解説を読むだけでも楽しめる。化石の発見・研究史がさまざまなエピソードや想像図と共に紹介されているだけでなく、現在もなお研究途上にあるホットな話題がわかりやすく語られ、「知の再発見」にふさわしい内容になっている。評者を含め古生物学の専門家ではない人あるいは日頃地質学にはあまり縁の無い人に向けた本と言えるかも知れない。

この本を楽しくしているもうひとつの点は、訳の



良さにあるだろう。翻訳本に有りがちなぎくしゃくした文がなく、実に滑らかな日本語になっている。翻訳に相当の時間と労力をかけたのではなからうか。なお、後半の資料篇には、日本人研究者による解説(一部は小島(1991)「地質ニュース」442号を改稿)も加えられ、読者の理解を助けるよう工夫されている。(地質ニュース編集委員会 佐藤興平)